第 37 卷第 8 期 生 态 学 报 Vol.37,No.8
2017 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201512282592
段呈,吴玲,王绍明,贺凌云.近 30 年古尔班通古特沙漠短命植物的时空格局.生态学报,2017,37(8):2642-2652.
Duan C, Wu L, Wang S M, He L Y. Analysis of spatio-temporal patterns of ephemeral plants in the Gurbantünggüt Desert over the last 30 years. Acta Ecologica Sinica,2017,37(8):2642-2652.

近 30 年古尔班通古特沙漠短命植物的时空格局

段 呈[1],吴 玲[1,*],王绍明[1],贺凌云[2]
1 石河子大学生命科学学院, 石河子 832003
2 石河子大学理学院, 石河子 832003

摘要:基于 1985—1999 年的 GIMMS-NDVI 数据和 2000—2014 年的 MODIS-NDVI 数据提取短命植物的时空格局,结合野外调查数据和 1985—2014 年气象站点气温和降水数据,从不同时空尺度上分析了古尔班通古特沙漠短命植物的时空变化及其对气候变化的响应。结果表明:(1)古尔班通古特沙漠中短命植物层片整体表现出物种组成简单,优势度高、多样性和覆盖度低等特征,且层片特征主要是由优势物种所主导,在早春至盛夏期间,由于短暂的生活史造成层片整体在物候上有一个明显的起伏差异。(2)沙漠中短命植物覆盖度最高的区域为南部和中东部,北部次之,西部最少。就时间变化趋势而言,受近 30 年早春温度和冬春降水增加的影响,短命植物覆盖的区域面积呈现出明显的增加趋势。(3)1985—2014 年间 3、4 月温度和冬春两季降水量呈上升趋势,而反映短命植物长势的 NDVI 值与冬春两季降水量也呈正相关性,但就相关性程度而言,冬季降水量与 NDVI 呈显著性相关($P<0.05$, $r=0.405$),而春季降水由于时滞效应并未表现出显著相关性。

关键词: 短命植物;归一化植被指数;时空格局;气候变化;古尔班通古特沙漠

Analysis of spatio-temporal patterns of ephemeral plants in the Gurbantünggüt Desert over the last 30 years

DUAN Cheng[1], WU Ling[1,*], WANG Shaoming[1], HE Lingyun[2]
1 *Shihezi University, College of Life Science, Shihezi* 832003, *China*
2 *Shihezi University, College of Sciences, Shihezi* 832003, *China*

Abstract: Ephemeral plants are a special plant synusia in the Gurbantünggüt Desert, which has attracted attention from ecologists due to its diverse species and significant role in ecology. To our knowledge, no research has analyzed the spatio-temporal patterns of ephemeral plants on a large-scale. Taking the Gurbantünggüt Desert —located in the central region of the Junggar Basin, northwest China—as the study area, and using remote sensing data, meteorological data, and field survey, this study explored the dynamic change in ephemeral plant cover in response to climate change on different spatio-temporal scales over the last 30 years. The results showed that, as far as the ephemeral plants synusia in the Gurbantünggüt Desert is concerned, the vegetation cover is low with simple community composition, high dominance, and low diversity, and the whole synusia undergoes an evident fluctuation in phenological change from early spring to summer. In addition to the phenological change in the ephemeral plant synusia, the normalized difference vegetation index (NDVI) in the desert also clearly fluctuates from early spring to summer, which is related to the life cycle of ephemeral plants. Using the phenological change characteristics of the ephemeral plant synusia, we extracted the NDVI during the phenological phases of ephemeral plants, and analyzed the spatio-temporal change of ephemeral plant cover from 1985 to 2014. In terms of spatial distribution, the highest cover area was in the south of the desert, followed by the mid-east and northern regions, with the

基金项目:国家青年科学基金项目(31300406);新疆生产建设兵团社会发展科技攻关与成果转化计划项目(2015AD023)
收稿日期:2015-12-28; **网络出版日期**:2016-10-19
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lingw@ shzu.edu.cn

western area showing the lowest cover area. With respect to temporal tendency, statistical analysis of the cover area showed that the ephemeral plant cover had a gradually increasing trend, which was attributable to an increase in temperature and precipitation during the research period. The highest cover area was in the oasis-desert ectone, which was due to the agricultural land located in this area. The artificial oases can supply sufficient surface water, which is beneficial for the growth of ephemeral plants. Conversely, the central desert region showed a low cover distribution pattern, which may be related to the lack of surface runoff and deep groundwater; the growth of ephemeral plants in the desert is completely reliant on atmospheric precipitation recharge. With respect to climate change, the spring temperature and precipitation showed an obvious increase from 1985 to 2014, and there was also an increase in winter precipitation. These notable increases in precipitation and temperature are of benefit to ephemeral plants. For yearly variation, the linear correlation coefficient indicated that NDVI was positively correlated with spring precipitation and winter precipitation. However, in terms of correlation coefficients, the NDVI was significantly positively correlated with winter precipitation ($P < 0.05$, $r = 0.405$), whereas spring precipitation showed a weak positive correlation due to a time-lag effect. Moreover, according to an analysis of spatial differentiation of soil water content, climate change was not the key factor affecting the spatio-temporal change of ephemeral plants, but that the impact of human disturbance on the spatial distribution of ephemeral plants in local areas should be taken into consideration when assessing the large-scale spatio-temporal distribution of ephemeral plants. Therefore, in order to obtain a more accurate analysis of the dynamic change trends of ephemeral plants, future research will focus on human influence in local areas.

Key Words: ephemeral plants; normalized difference vegetation index; spatio-temporal pattern; climate change; Gurbantünggüt Desert

短命植物是一类生长在荒漠地带或中生落叶林下的生活周期或年生长期很短的特殊植物类群的总称[1]。短命植物适应“春雨型”降水和暖湿的水热条件,以逃避干旱迅速完成营养周期,是中亚荒漠亚区中一类特殊的中生植物区系[2],其在我国主要分布在新疆北部,准噶尔盆地东缘是其分布区的最东界限[3]。

短命植物以其丰富的种类和重要的生态学意义而深受国内外学者的关注。Sunmonu 和 Kudo[4-5]研究了光照和温度对短命植物生长和繁殖的影响。Yoshie[6]探讨了气候变化对短命植物展叶周期的影响。Kim 等人[7]讨论了山地落叶林早期林冠郁闭对短命植物生长和繁殖的影响。国外关于短命植物的研究报道还涉及,全球气候变化对短命植物的影响及其响应机制[8],沙漠生态环境变化与短命植物生长的关系[9-10],个别短命植物生理和形态结构特征[11-12]。国内相关的研究报道主要以新疆北部的早春短命植物为主,涉及的领域有短命植物的区系特征[13],某些短命植物的生物学特性和生理生态学特征[14-15],短命植物群落与环境之间的关系[16-17],短命植物物候学[18-19]。此外,由于短命植物对于古尔班通古特沙漠早春时节沙面稳定具有不可替代的作用[20],故已有众多学者对古尔班通古特沙漠短命植物进行了诸多方面的研究,袁素芬等[21]通过野外调查揭示了短命植物层片年内变化。钱亦兵等[22]研究了古尔班通古特沙漠短命植物的空间分布特征及其对沙漠生境变化梯度的响应。但关于古尔班通古特沙漠短命植物在宏观尺度下时空格局的研究尚未见报道。因此,本文以古尔班通古特沙漠为研究区域,采用近 30 年的遥感数据和气象数据,结合野外调查数据,分析不同时空尺度下短命植物覆盖的时空变化及气候变化特征,以期探讨近 30 年来气候变化对古尔班通古特沙漠中短命植物时空格局的影响。

1 数据与方法

1.1 研究区概况与范围

研究区古尔班通古特沙漠位于我国新疆准噶尔盆地中南部(44°11′—46°20′N, 84°31′—90°00′E;图 1),面积 5.113 万 km^2[23],是我国最大的固定、半固定沙漠。古尔班通古特沙漠属于典型温带荒漠,年降水量普遍

不超过 150 mm,沙漠腹地仅有 70—100 mm,而蒸发量却高达近 2000 mm,是降水量的 20—30 倍[24]。古尔班通古特沙漠虽然降水少,但季节分配却较干旱区其他沙漠均匀,冬春两季的降水量合计占全年的 30%—45%,且冬季降水以固体的形式在地表形成稳定的积雪量,每年春季来临,积雪融化,沙土层便得到部分的水分补给而形成较稳定的悬湿沙层,在 4—5 月间,50 cm 的土层平均土壤含水率可达 25 g/kg 以上,这是短命植物得到良好生长发育的有利条件[25]。

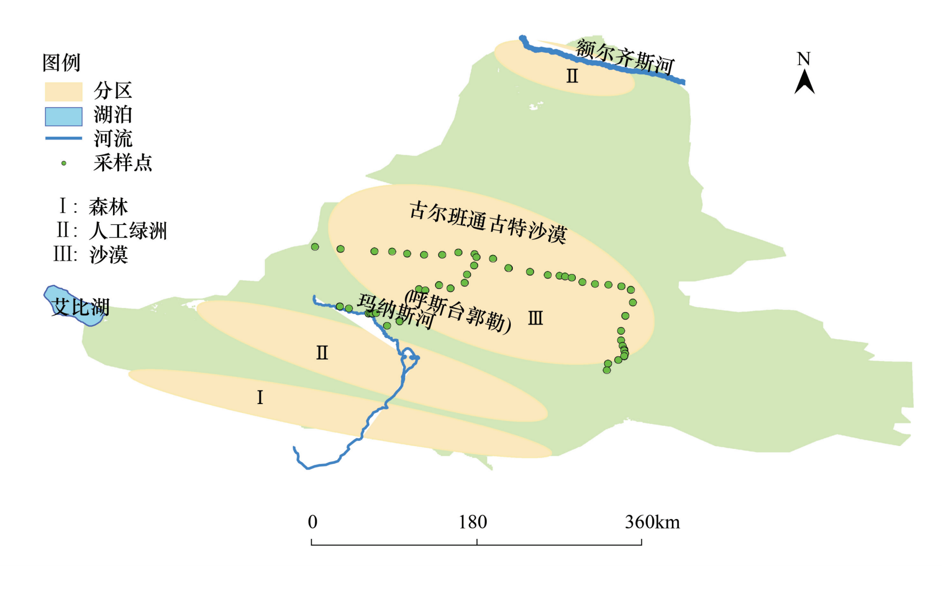


图 1 研究区及采样点示意图

Fig.1 Map of the study area and sampling sites

1.2 数据来源及预处理

本文所使用的数据:(1) GIMMS-NDVI 数据,来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn),时间分辨率 15 d,空间分辨率 8 km,该数据已经过预处理可直接使用遥感图像处理软件进行处理分析,时间跨度从 1985 年到 1999 年。(2) MOD13Q1(https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products),由 NASA 的 LP DAAC(Land Processes Distributed Active Archive Center)工作组负责处理和发布,轨道号 h23v04, h24v04,时间分辨率 16 d,空间分辨率 250 m。该数据集已经经过了大气校正、几何校正等预处理,消除了太阳高度角、传感器时间灵敏度等影响,时间跨度从 2000 年到 2014 年。(3)气象数据由中国气象科学数据共享服务网提供(https://cdc.cma.gov.cn),包括沙漠周边 7 个主要气象站(乌鲁木齐、奇台、富蕴、克拉玛依、和布克塞尔、精河、乌兰乌苏、)月降水、温度数据,时间跨度从 1985 年到 2014 年。

MODIS 遥感数据预处理使用 NASA 免费提供的 MRT(MODIS Reprojection Tool)软件,预处理包括对下载的原始数据批量进行格式转换(原始影像 HDF 格式转换为 TIFF 格式),影像拼接和地图投影转换(数据自带的 Sinusoidal 转换成 WGS84 地理坐标系下的 Geographic Lat/Lon),最后,在遥感图像处理软件 ENVI 4.8 支持下进行后续的研究区影像裁剪、波段运算等图像处理。

1.3 研究方法

1.3.1 野外调查

于 2015 年 5 月 9—25 号,在古尔班通古特沙漠纵向和横向两条路线上进行野外抽样调查,共设置了 53 个样地(图 1),根据古尔班通古特沙漠草本层最小抽样面积[26],每个样地根据沙丘的高度和大小,以垂直于沙丘走向的方向设置 10 m×100 m 的样方,重复两次测量记录每个样方中的短命植物物种数、冠幅和盖度平均值。此外,由于沙漠中缺乏气象站观测数据,测定了每个样地的土壤含水量,以便结合周边气象站观测的降水数据来分析降水变化对短命植物层片的影响。由于风沙土成土过程微弱,分异差,以及短命植物根系的分布深度,土壤样品的采集选择在坡顶、坡中部、坡底 3 个部位分别分层取 0—10、10—30、30—50 cm 的土壤,另

外,在研究区选取了 3 个典型区域,即人工干扰区(沙漠油田区)、沙漠腹地、沙漠-绿洲过渡带(玛纳斯河流域附近),通过典型区域的土壤含水量变化来分析降水的空间变化,土壤含水量采用铝盒取样烘干称重法求出。

1.3.2　生态参数的选择和测度

相对频度和重要值是生态学中研究物种在群落中的地位和作用的重要数量指标,本文对调查到的植物进行了频度和重要值的计算。具体计算公式为:相对频度,$rf=n_i/N$,式中 n_i 表示某物种 i 出现的样地数,N 为总的样地数。重要值=(相对频度+相对密度+相对盖度)/3,计算结果可作为衡量优势种的依据,本文计算值均为所有样地的平均值。

1.3.3　短命植被覆盖分类划分

根据统计的研究期所有年份 NDVI 平均值,采用决策树分类法对不同短命植被覆盖度进行了简单的分类,具体阈值划分分类规则如下:

高覆盖　NDVI 值累计百分比大于 99%;

中等覆盖　NDVI 值累计百分比 95%—99%;

低覆盖　NDVI 值累计百分比 75%—95%;

稀疏或无覆盖　NDVI 值小于或等于 0。

2　结果与分析

2.1　古尔班通古特沙漠中短命植物的空间分布、层片组成及物候特性

野外调查期间,一共调查了 53 个样地,样地内共调查到 33 种短命植物(包括类短命植物)隶属于 15 科 28 属(表 1),其中十字花科短命植物 7 种,占到调查样地物种数的 21.2%;紫草科科短命植物 5 种,占 15.2%。在这 33 种短命植物中,优势物种为弯角四齿芥、土大戟、东方旱麦草和狭果鹤虱,其相对频度均高于 50%,尤其是东方旱麦草和土大戟两种短命植物分布最广,其重要值约 50%。此外,相对频度大于 30%的短命植物有 14 种,占到所有物种总数的 42.4%,在这 14 种短命植物中,除了 3 种为多年生的类短命植物外,其余 11 种均为一年生短命植物。另外,从表 1 中各物种所属的科和重要值可以看出,古尔班通古特沙漠短命植物层片组成相对简单且多样性低,在这 15 科中,有 8 个科只有一种短命植物且大多数重要值较低,除了相对特殊的大戟科和莎草科,因为其科下分别所属的土大戟和沙薹草两个物种重要值高达约 50%,具有明显的优势。

此外,可以从表 1 看出,对于 33 种短命植物物种的空间分布而言,物种分布最丰富的区域是在沙漠南部,然后是东部和北部,西部区域的物种分布最少。调查期间,在西部区域只发现了小甘菊(*Cancrinia discoidea*),土大戟(*Euphorbia turczaninowii*),东方旱麦草(*Eremopyrum orientale*),和小花角茴香(*Hypecoum parviflorum*)4 种物种,而且其生境往往是处于地势低,土壤质地粗糙,且高盐碱性的地方,这可能和 4 种短命植物具有较强的抗旱和耐盐碱的特性有关。而在南部和中东部区域,除了土大戟(*Euphorbia turczaninowii*),疏齿千里光(*Senecio subdentatus*),东方旱麦草(*Eremopyrum orientale*)等优势物种外,还发现一些相对频率较低,集中在少数科内的物种,例如:小花荆芥(*Nepeta micrantha*),小果菘蓝(*Isatis minima*),尖花天芥菜(*Heliotropium acutiflorum*)等物种,这些物种往往生长于质地较好,低盐碱,水分较多的沙质土壤生境中。对于短命植物的覆盖度而言,根据我们的调查,覆盖度最高的区域位于沙漠南部(约 44°18′—44°50′N),然后是中东部(约 44°50′—45°13′N, 87°32′—88°13′E)和北部(约 45°13′—45°24′N),西部地区最低(约 85°50′—87°30′E)。

对于古尔班通古特沙漠短命植物层片组成而言,根据其层片内的物种,其层片组成大致可以分为两种类型(表 2)。从表 2 可以看出,两种层片类型在物种组成上虽有差异但都相对简单,层片特征差异则主要在物候方面。多物种聚集型通常物候现象变化由优势种所主导,早春时节,优势种先于层片其他种开始萌发生长,且在繁盛期占据一定数量上的优势,待夏季来临时,层片大部分物种开始逐渐衰败;单一种群型,由于组成简单,物候变化往往是由种群变化所主导,单一种群通常生存于平缓沙地的梭梭群落下。虽然由于物种组成的差异导致在两种层片在物候变化上有所差异,但是总的来说短命植物的层片在早春到盛夏期间,物候上有一

个明显起伏的变化,随着早春温度的回升和积雪的融化,物种开始萌发生长,在 5 月份达到繁盛期,至酷热的夏季来临时,层片大部分物种开始衰败,由于短命植物短暂的生活史造成在层片的物候方面形成一个明显的起伏差异。

表 1 古尔班通古特沙漠主要短命植物种类组成与空间分布

Table 1 The major species composition and spatial distribution of ephemeral plants in the Gurbantünggüt desert

科 Family	种 Species	相对频度 *rf*/%	重要值 *IV*/%	空间分布 Spatial distribution				
				南 South	北 North	中 Middle	东 East	西 West
十字花科 Cruciferae	线叶庭荠 *Alyssum linifolium*	42.42	21.43	+	+	+	+	
	厚果庭荠 *Alyssum dasycarpum*	3.03	1.54	+	+		+	
	小花糖芥 *Erysimum cheiranthoides*	3.03	1.53	+			+	
	弯角四齿芥 *Tetracme recurvata*	51.52	27.88	+		+	+	
	螺喙芥 *Spirorrhynchus sabulosus*	42.42	21.39	+		+	+	
	宽翅菘蓝 *Isatis violascens*	18.18	9.14	+		+	+	
	小果菘蓝 *Isatis minima*	3.03	1.54			+	+	
菊科 Compositae	小甘菊 *Cancrinia discoidea*	6.06	3.05		+	+		+
	蓝刺头 *Echinops gmelinii*	69.7	35.46	+		+	+	
	顶毛鼠毛菊 *Epilasia acrolasia*	9.09	4.55	+				
	疏齿千里光 *Senecio subdentatus*	65.57	21.86	+	+	+	+	
紫草科 Borraginaceae	假狼紫草 *Nonea caspica*	54.55	27.62	+	+		+	
	硬萼软紫草 *Arnebia decumbens*	75.76	39.55	+	+	+	+	
	狭果鹤虱 *Lappula semiglabra*	78.79	42.82	+	+	+	+	
	尖花天芥菜 *Heliotropium acutiflorum*	6.06	3.05	+			+	
	小花天芥菜 *Heliotropium micranthum*	6.06	3.03	+				
禾本科 Gramineae	齿稃草 *Schismus arabicus*	36.36	21.99	+	+	+	+	
	东方旱麦草 *Eremopyrum orientale*	93.94	50.49	+	+	+	+	+
豆科 Leguminosae	镰荚黄芪 *Astragalus arpilobus*	15.15	7.62	+		+		
	弯果胡卢巴 *Trigonella arcuata*	9.09	4.69				+	
唇形科 Labiatae	小花荆芥 *Nepeta micrantha*	15.15	7.62	+		+		
石竹科 Caryophyllaceae	沙地蝇子草 *Silene olgiana*	6.06	3.05				+	
罂粟科 Papaveraceae	小花角茴香 *Hypecoum parviflorum*	6.06	3.04					+
车前科 Plantaginaceae	小车前 *Plantago minuta*	21.21	10.75	+		+		
大戟科 Euphorbiaceae	土大戟 *Euphorbia turczaninowii*	87.88	47.75	+	+	+	+	+
玄参科 Scrophulariaceae	弯果婆婆纳 *Veronica campylopoda*	3.03	1.52	+				
莎草科 Cyperaceae	沙薹草 *Carex physodes* *	45.45	45.54	+	+	+	+	
伞形科	簇花芹 *Soranthus meyeri* *	39.39	19.77	+	+	+	+	
	荒地阿魏 *Ferula syreitschikowii* *	6.06	3.08			+		
百合科 Liliaceae	叉梗顶冰花 *Gagea divaricata* *	3.03	1.58	+				
	粗柄独尾草 *Eremurus inderiensis* *	36.36	20.73	+	+	+	+	
	异翅独尾草 *Eremurus anisopterus* *	21.21	11.53	+				
石蒜科 Amaryllidaceae	鸢尾蒜 *Ixiolirion tataricum* *	12.12	6.31		+	+		

* 表示类短命植物

表 2　古尔班通古特沙漠短命植物层片特征

Table 2　Synusia characteristics of ephemeral plants in the Gurbantünggüt Desert

层片类型 Synusia type	层片物种组成 Synusia composition of major species	层片特征 Synusia characteristics
A:多物种群聚型 Multi-species	主要的物种组成包括: 弯角四齿芥 *Tetracme recurvata*; 疏齿千里光 *Senecio subdentatus*; 硬萼软紫草 *Arnebia decumbens*; 狭果鹤虱 *Lappula semiglabra*; 齿稃草 *Schismus arabicus*; 土大戟 *Euphorbia turczaninowii*; 东方旱麦草 *Eremopyrum orientale* 等	这类群落往往聚集了多种短命植物,通常疏齿千里光,土大戟和东方旱麦草等是此群落的优势物种且数量占据大部分。随着早春温度的回升,优势物种的物候变化,群落季相产生一个明显的更替,优势物种在早春先于其他物种萌发生长,待 5 月群落中大部分物种达到繁盛期, 等夏季到来时,大部分物种先于优势种开始衰败,最后群落物种往往只有优势种占据主导。
B:单一种群型 Single species	主要的物种包括:: 土大戟 *Euphorbia turczaninowii*; 疏齿千里光 *Senecio subdentatus*; 囊果薹草 *Carex physodes*; 粗柄独尾草 *Eremurus inderiensis*; 东方旱麦草 *Eremopyrum orientale* 等	该群落往往由单一种群的大量个体组成,由于组成简单,物候变化通常就是某一种群的变化,物候更替简单

2.2　短命植物物候期内 NDVI 值的提取及时空分析

正如上节所述,从早春时节到初夏,古尔班通古特沙漠中短命植物层片存在一个明显的物候季相变化,那么如何利用短命植物层片这种明显的季相差在遥感影像中提取短命植物的空间分布信息? 为此统计了近十几年的 MODIS-NDVI 数据从早春到初夏期间的变化,此外,为了准确反映沙漠中 NDVI 值的变化,排除周边绿洲-荒漠过渡带和西部地区的低值区域的干扰,在沙漠偏中东部区域划出一个东西长 200 km,南北宽 150 km 的矩形范围作为沙漠中 NDVI 值的统计区域,从早春到初夏期间的 NDVI 值变化统计结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,在沙漠中从第 97 天到 145 天的 NDVI 值有一个快速的增长,在这之后 16 d 的 NDVI 值有一个明显的下降,然后在第 161 天有所上升达到稳定至第 209 天。中部沙漠区域在这一段时期明显的 NDVI 变化可以看作主要是由短命植物所造成的,早春时节雪水的融化和温度的回升为短命植物的萌发和生长造成了短期的适宜性环境,沙漠中的短命植物先于其他植被开始生长,而在初夏来临之时,短命植物开始迅速衰败,此时沙漠中其他多年生草本及灌木也开始繁盛以至于 NDVI 值并没有产生较大的起伏变化。

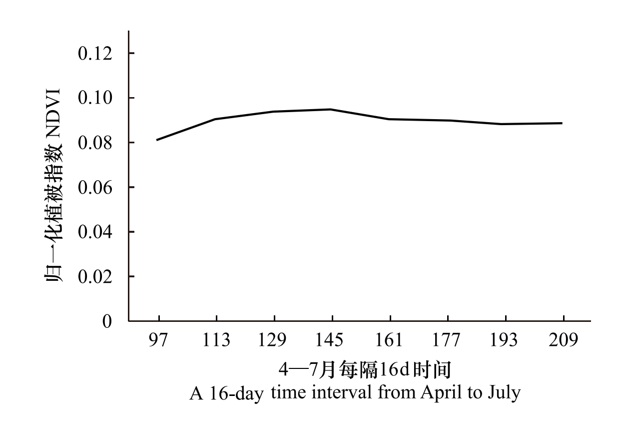


图 2　多年 4—7 月的 NDVI 平均值

Fig.2　Multi-year average NDVI from April to July

根据短命植物群落的物候变化及影像中 NDVI 值明显的起伏变化,如果用每年在第 145 天表现为高值的影像和之后 16 d 表现为低值影像进行相减,即在此时间段 NDVI 的增量值在一定程度上可以认为是短命植物长势所造成的,那么最后在影像中表现为高值的区域即是短命植物覆盖高的区域。因此,提取不同年份的短命植物空间分布信息,但之后我们发现,影像中高值的区域在有些年份相同,但有些年份却不同,这可能是由于短命植物的分布易受到气候变化的影响。当然,也有可能是由于影像本身的噪声和误差所致,忽略这部分影响,将 2000—2014 年共 15 a 的影像相加并除以总年份 15,平均后影像中高值区域的分布与多年的相同,然后根据 NDVI 值的累积百分比运用决策树分类法对不同覆盖度进行了分类,最后获得了短命植物时空分布格局图。另外,由于 GIMMS-NDVI 较低的空间分辨率,为避免影像误差在提取 1985—1999 年的短命植物空间分布信息时选择以 MODIS 数据的提取时期为主,同样选择 5 月底的高值影像和之后一期的低值影像进行相减,然后将 15 a 的影像进行相加并除以总数,求取影像中的 NDVI 平均值后运用决策树分类进行覆盖度的划分。

最后,由 GIMMS-NDVI 和 MODIS-NDVI 数据提取的近 30 年的短命植物时空分布格局如图 3 所示。

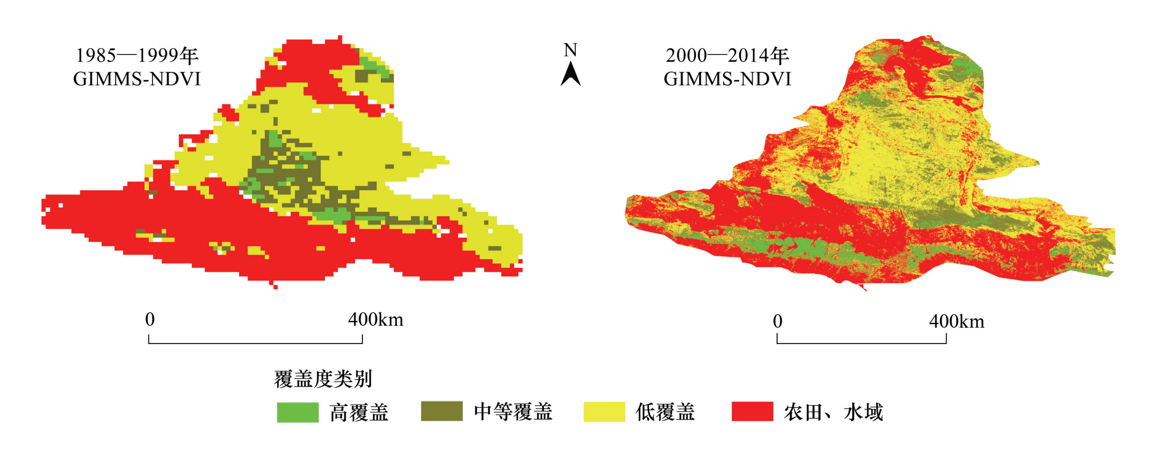


图 3 短命植物时空分布格局

Fig.3 The spatio-temporal distribution pattern of ephemeral plant

从图 3 可以看出,红色表示的负值区域基本和高山森林带、农田、水域和戈壁等分布区域一致,黄色代表的低覆盖分布区域则以中部区域的古尔班通古特沙漠为主。根据 GIMMS-NDVI 和 MODIS-NDVI 数据反映来看,短命植物的空间分布在整个古尔班通古特沙漠中覆盖度最高的区域为南部和中部,北部次之,西部区域最低。从分布的区域可以看出,靠近绿洲-沙漠过渡带附近的短命植物覆盖度更高,这与绿洲边缘提供的良好资源有关,充足的水分和温和的气候条件为短命植物的生长提供了更有利的条件。此外,从不同数据所反映的短命植物分布的空间变化来看,近 30 年来短命植物的空间分布区域有所增加,尤其是在沙漠南部靠近绿洲区域的中等覆盖度区域的增加。

2.3 短命植物时空变化及其影响因素分析

为了解短命植物近 30 年来的时空变化情况,计算了不同年份不同覆盖度的面积。如表 3 所示,除了农田、水域占大部分比例外,短命植被覆盖度主要以中低覆盖度为主,高覆盖度占少数比例。此外,不同年份不同覆盖度的面积存在不同的变化趋势,例如,高覆盖度的面积 1985 年只有 3072 km^2,1999 年增加到 4224 km^2,至 2014 年已增加到 17437 km^2,在这 30 年期间表现出明显的增加趋势;而中等覆盖度的面积在 1985 年有 14976 km^2,1999 年增加到 16640 km^2,2000 年为 10233.688 km^2,到 2014 年变为 14970.688 km^2,虽在研究期间整体呈下降趋势,但从不同空间分辨率遥感数据的时间跨度分开来看,中等覆盖度的面积仍表现出增加趋势。虽然受到降水变化的影响,不同年份不同类别覆盖度的面积表现出不同变化趋势,但高覆盖度的面积仍然表现出逐渐增加的趋势,这和近 30 年来春季温度的上升以及冬春两季降水的增加有关。根据沙漠周边主要气象站的气象数据统计,近 30 年来降水和温度变化结果如图 4 所示,3 月平均温度在-10—5℃之间变化,4 月平均温度则在 5—15℃之间变化,就二者的年际间差异变化而言,3 月平均温度差异较大,最大年际间差异达 12.5℃,之后随着温度的升高,4 月份气温的年际间差异有所减小。此外,从平均温度的年际变化来看,近 30 年期间两个月份的平均温度存在明显的上升趋势;另外,就冬春两季的降水总量而言,二者在 1985—2014 年呈现出明显的上升趋势。从季节分布来看,春季降水量明显高于冬季,其中 1998 年和 2009 年的两季降水量差高达 150 mm 以上。从降水量的年际间差异来看,冬季降水量的起伏较稳定,各个年份间的差异相较不大,而春季降水量则存在明显的起伏波动,各个年份间的差异也较大,最低 1989 年为 48.33 mm,最高年份 1998 年为 255.71 mm,二者之差高达 207.38 mm。

早春时节的温度主要影响短命植物的萌发,而短命植物群落的年际变化则主要受降水变化的影响。为了解降水量对短命植物群落的变化影响,统计了近 30 年来在沙漠偏中东部划出的矩形范围的 NDVI 值,以便和降水量做相关性分析。如图 5 所示,表示短命植物长势的 NDVI 值与冬春两季的降水量表现出正相关性,且冬季降水相关性明显高于春季降水,为检验NDVI与降水量之间的相关性,使用SPSS软件进行相关性分析,

表 3　1985—2014 年间不同年份不同覆盖分类面积统计

Table 3　Statistics on different cover classification areas in different years from 1985 to 2014

分类 Classification 年份 Year	高 High		中 Medium		低 Low		农田、水域 Cropland and water	
	面积 Area/km²	比例 Ratio/%	面积 Area/km²	比例 Ratio/%	面积 Area/km²	比例 Ratio/%	面积 Area/km²	比例 Ratio/%
1985	3072	0.73	14976	3.54	84224	19.92	320640	75.81
1990	3776	0.89	16768	3.96	83840	19.82	318528	75.33
1995	3008	0.71	15616	3.69	67072	15.86	337216	79.74
1999	4224	0.99	16640	3.93	80128	18.95	321920	76.13
2000	21356.125	3.91	10233.688	1.87	50688.188	9.29	463625.875	84.93
2005	39205.875	7.18	11942.438	2.19	62727.125	11.49	432028.438	79.14
2008	15135.375	2.77	6315.25	1.16	108643.375	19.90	415809.875	76.17
2014	17437	3.19	14970.688	2.74	85628.25	15.69	427867.938	78.38

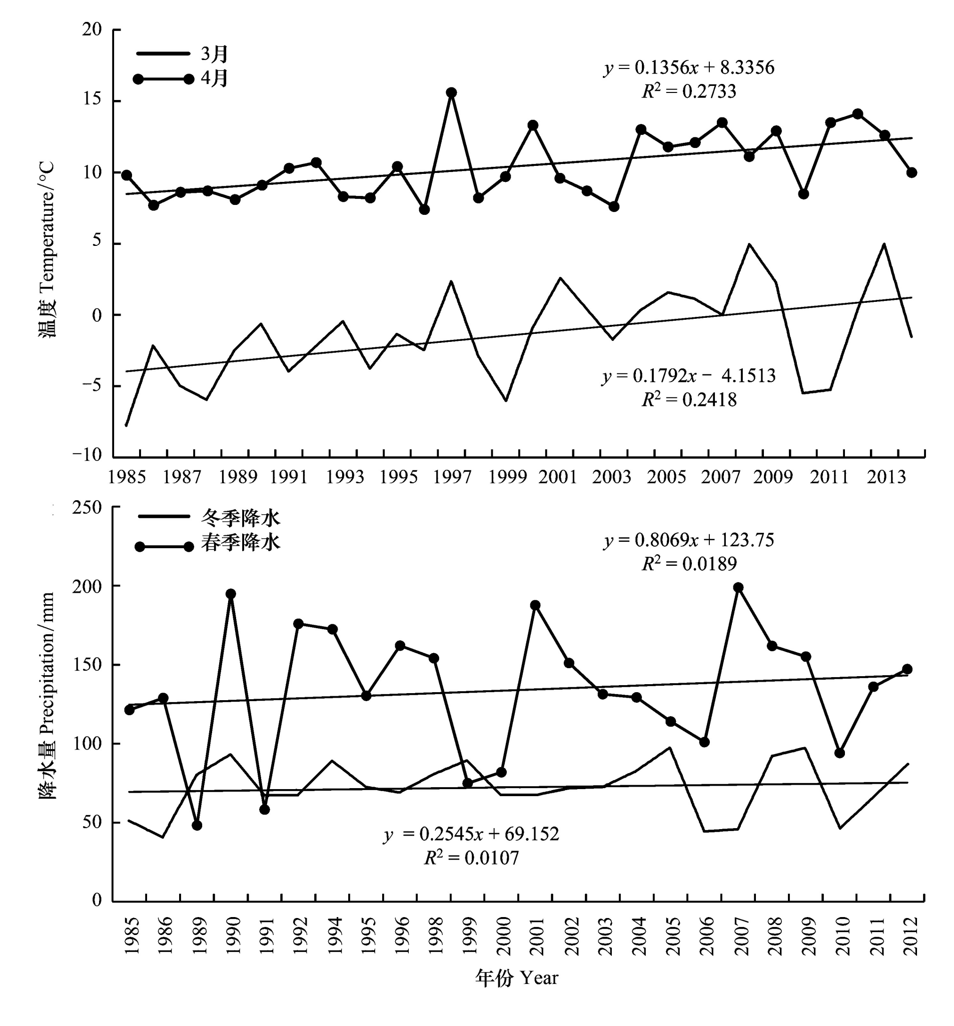


图 4　1985—2014 年间温度和降水量变化

Fig.4　The change of temperature and precipitation from 1985 to 2014

结果表明短命植物与冬季降水存在显著正相关性($P<0.05$, $r=0.405$)而与春季降水存在不显著的正相关性。另外,由于缺乏沙漠中降水数据,为了解沙漠中降水的空间分布变化,测量了沙漠中土壤含水量,而春季沙漠土壤含水量则主要受降水量的影响,因此,拟通过土壤含水量的空间分布变化来了解沙漠中降水变化对短命植物空间分布的影响。根据结果所示(图 5),土壤含水量与短命植物 NDVI 值存在显著正相关性($P<0.05$,

r=0.467),此外,由于受到植被、地形、地貌、人类活动等影响,古尔班通古特沙漠土壤含水量存在明显的空间分布差异,选取了3种典型代表区域:人工干扰区域,沙漠腹地,沙漠-绿洲过渡带,如图5所示,3种典型代表区域不同分层的土壤含水量存在明显的差异,就土壤含水量总体而言,沙漠-绿洲过渡带各个土壤分层的含水量最高,沙漠腹地次之,人工干扰区域最低。从不同区域的不同土壤层位含水量来看,受自然因素和人为活动的影响,3个区域不同分层土壤含水量呈现出明显的空间差异。

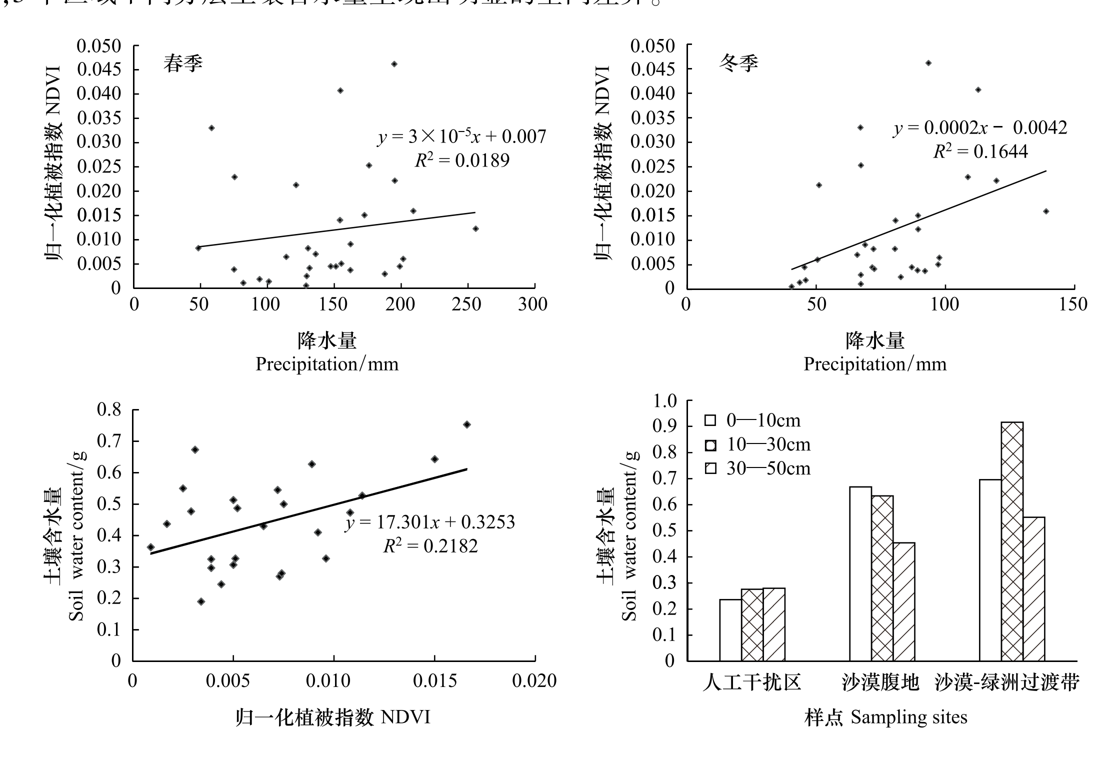


图5 短命植物时空变化影响因素相关性分析

Fig.5 The correlation of affecting factors in spatio-temporal change of ephemeral plant

3 讨论

3.1 古尔班通古特沙漠短命植物片层群落特征及物候特性

由于时间和调查范围有限,本文在调查期间并未发现所有短命植物种类,根据前人的调查统计[24],古尔班通古特沙漠短命植物66种(包括类短命植物),约占到新疆北部所有短命植物总数的1/3,但据袁素芬[27]等人2005—2008年对准噶尔荒漠短命植物层片连续四年的野外调查结果,短命植物层片物种组成年际间并无明显差异,只是受水热条件的影响而产生物种盖度、密度上的差异。此外,就短命植物层片特征及物候特性而言,袁素芬等[21]对古尔班通古特沙漠短命植物层片年内变化的调查表明,短命植物种群频度、物种多样性、层盖度和高度均以5月初为最高,至5月底则显著下降。本研究的野外调查结果显示,短命植物层片特征主要是由优势物种所主导,在早春到盛夏期间,层片整体在物候方面存在一个明显的起伏差异,而这与前人的物候观测并无异议[18]。

3.2 短命植物物候期内NDVI值的提取及时空分析

根据短命植物层片物候上的季相差特征,本研究对遥感影像中反映短命植物长势的NDVI进行了提取和空间分析,但出于数据准确性的考虑,没有将GIMMS和MODIS的长时间序列数据进行统一,造成在对短命植物分布的时空变化分析阶段时间连续性受到干扰,但就不同时间跨度和空间分辨率的遥感数据而言,反映短命植物长势的NDVI空间数据与野外调查期间所观察到的物候变化基本一致。此外,就整个沙漠区域的短命植物覆盖度情况而言,沙漠内部由于地表缺乏径流使得短命植物的生长只能依靠大气降水的补给,所以覆盖

度相对较低,而靠近外部的绿洲-沙漠过渡带附近的短命植物覆盖度更高,这与过渡带疏松的土壤质地以及相对稍好的水分条件有关[3]。另外,本文利用 NDVI 值来反映短命植物的长势,虽然沙漠中 4—7 月的 NDVI 值变化与短命植物层片的物候变化相一致,可以看作主要是由短命植物造成的,但考虑到 NDVI 值自身的误差影响以及研究区域复杂的景观类型(荒漠-绿洲带,固定/半固定沙地,戈壁),这些没能消除的影响可能会导致分析的结果存在一些误差。

3.3　气候变化对短命植物时空变化的影响

已有研究表明,短命植物的层片结构、盖度、密度等易受到降水变化的影响[28],而短命植物层片年际间的动态变化则主要受到冬春季节水热条件变化的影响[27]。就短命植物层片与温度的关系而言,早春温度主要影响短命植物的物种萌发,而当年萌发的植株数目则决定当年短命植物层片物种数的多少,如果温度的变化使得物种萌发受限,势必会影响层片的物种数量和多样性。古尔班通古特沙漠每年冬季存在稳定的降雪量,待早春季节融化后可形成较稳定和湿润的土壤悬湿层[25],因此,每年 3、4 月的温度变化对短命植物物种的萌发生长影响至关重要。另据张海波[29]等人 2007 年的研究表明,荒漠短命植物种子的低温层处理上下限为 0—10℃,若温度长期持续在较低条件下,会引发种子的萌发时间滞后,使其植物种群结构、盖度、密度等受到影响。根据研究期间气象站的气温数据显示,虽然有些年份 3 月平均温度在 0℃以下,但近 30 年来 3 月份的平均温度总体表现为上升趋势,这为短命植物的物种萌发提供了较好的条件。至 4 月份春季气温逐渐回升后,水分条件则成为限制短命植物生长发育的主要因素,据气象数据统计显示近 30 年来冬春两季的降水量明显增加,而 Li[30]等研究表明,西北干旱区近 50 年来降水显著增加的主要原因是春夏两季降水的明显增多,春夏时节降水的增加对短命植物的生长而言是有利的条件。对于近 30 年来反映短命植物长势的 NDVI 值与冬春两季降水量的相关性程度而言,春季 4、5 月正是短命植物生长的繁盛期,此时的降水对于塑造短命植物层片特征具有强烈的影响,而 NDVI 与此阶段降水量表现出的弱相关性可能是和降水量滞后性有关,且影像中提取的 NDVI 值反映的是短命植物繁盛期与衰败期的长势之差,这就可能造成 NDVI 与春季降水量表现出明显的时滞效应。除滞后效应外,降水的时间分布也影响着短命植物群落的变化,本文求取 3、4、5 月的 3 个月份降水量的平均值作为春季平均降水量,从春季降水量的年际变化可以看出,不同年份间的春季降水波动较大,这与不同年份的降水时间分配有关。此外,短命植物的生长对于偶然性降水具有极大的敏感性和适应性,在极端干旱的条件下,短命植物种子会通过休眠来逃避物种灭绝,待环境中合适的水条件出现时便会出现爆发性的萌发,这种非一次性萌发机制可造成种群的变化从而影响层片结构特征[28]。

另外,有研究表明,早春表层土壤水分在个体沙丘表面的分异直接影响到短命植物的分布[16]。受自然因素和人为活动的影响,本文选取的 3 个典型区域不同层位土壤含水量存在明显的空间差异,但从影响因素角度分析可知,在人工干扰严重区域气候变化不再是主导因素。近几十年,由于人类活动引发的土地利用和覆盖变化(LUCC)已经导致短命植物自然生境受到影响,尤其是在沙漠-绿洲过渡带,出现大量的自然植被景观破碎化情况,虽然气候变化是制约短命植物时空分布变化的主要因素,但在局部区域受人类活动干扰所引发的空间分布变化也不容忽视。因此,今后对于影响短命植物时空分布变化的因素研究还需要将人类活动的影响考虑其中,以便更好的分析其动态变化趋势。

4　结论

综上所述,可以得出以下结论:

(1)古尔班通古特沙漠短命植物层片整体表现出物种组成简单,优势度高、多样性和覆盖度低等特征,且层片特征主要是由优势物种所主导,在早春至盛夏期间,由于短暂的生活史造成层片整体在物候上有一个明显的起伏差异。

(2)古尔班通古特沙漠短命植物覆盖分布格局存在明显的时空差异,从空间分布来看,覆盖最高的区域位于沙漠南部和中东部,北部次之,西部最少,而这一分布规律与野外调查的物种丰富度和覆盖度的结果一

致;就时间变化趋势而言,受近 30 年早春温度和冬春降水增加的影响,短命植物整体表现出良好的趋势,覆盖的区域面积呈现出明显的增加趋势。

(3)古尔班通古特沙漠近 30 年来 3、4 月温度和冬春两季降水均呈上升趋势,而反映短命植物长势的 NDVI 值与冬春两季降水量也呈正相关性,但就相关性程度而言,冬季降水量与 NDVI 呈显著性相关($P<0.05$, $r=0.405$),而春季降水由于时滞效应并未表现出显著相关性。

参考文献(References):

[1] Went F W. Ecology of desert plants. I. Observations on germination in the Joshua Tree National Monument, California. Ecology, 1948, 29(3): 242-253.

[2] 钱亦兵, 吴兆宁. 古尔班通古特沙漠环境研究. 北京: 科学出版社, 2010.

[3] 张立运. 新疆莫索湾地区短命植物的初步研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 1985, 9(3): 213-221.

[4] Sunmonu N, Kudo G. How do sink and source activities influence the reproduction and vegetative growth of spring ephemeral herbs under different light conditions?. Journal of Plant Research, 2014, 127(4): 503-511.

[5] Sunmonu N, Kudo G. Warm temperature conditions restrict the sexual reproduction and vegetative growth of the spring ephemeral *Gagea lutea* (Liliaceae). Plant Ecology, 2015, 216(10): 1419-1431.

[6] Yoshie F. Effects of growth temperature and winter duration on leaf phenology of a spring ephemeral (*Gagea lutea*) and a summergreen forb (*Maianthemum dilatatum*). Journal of Plant Research, 2008, 121(5): 483-492.

[7] Kim H J, Jung J B, Jang Y L, Sung J H, Park P S. Effects of experimental early canopy closure on the growth and reproduction of spring ephemeral *Erythronium japonicum* in a montane deciduous forest. Journal of Plant Biology, 2015, 58(3): 164-174.

[8] Kudo G, Nishikawa Y, Kasagi T, Kosuge S. Does seed production of spring ephemerals decrease when spring comes early?. Ecological Research, 2004, 19(2): 255-259.

[9] Hesse P P, Simpson R L. Variable vegetation cover and episodic sand movement on longitudinal desert sand dunes. Geomorphology, 2006, 81(3/4): 276-291.

[10] Milton S J, Dean W R J. Disturbance, drought and dynamics of desert dune grassland, South Africa. Plant Ecology, 2000, 150(1/2): 37-51.

[11] Sunmonu N, Ida T Y, Kudo G. Photosynthetic compensation by the reproductive structures in the spring ephemeral *Gagea lutea*. Plant Ecology, 2013, 214(2): 175-188.

[12] Masters J, Emery S M. The showy invasive plant *Ranunculus ficaria* facilitates pollinator activity, pollen deposition, but not always seed production for two native spring ephemeral plants. Biological Invasions, 2015, 17(8): 2329-2337.

[13] 毛祖美, 冯惠兰. 新疆短命植物区系的研究: 新疆植物学研究文集. 北京: 科学出版社, 1991: 93-101.

[14] 吴玲, 张霞, 马淼, 王绍明. 新疆独尾草属植物的核型分析. 武汉植物学研究, 2005, 23(6): 541-544.

[15] 吴玲, 张霞, 王绍明. 粗柄独尾草种子萌发特性的研究. 种子, 2005, 24(7): 1-4.

[16] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 赵从举. 短命植物分布与沙垄表层土壤水分的关系——以古尔班通古特沙漠为例. 应用生态学报, 2004, 15(4): 556-560.

[17] 张荣, 刘彤. 古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类. 生态学报, 2012, 32(19): 6056-6066.

[18] 王烨. 新疆早春短命及类短命植物的物候观测. 干旱区研究, 1993, 10(3): 34-39.

[19] 马生军, 谭敦炎. 短命植物甘新念珠芥(*Neotorularia korolkovii*)和宽翅菘蓝(*Isatis violascens*)的物候与性表达特征. 生态学报, 2007, 27(2): 486-496.

[20] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 张伟民, 钱亦兵. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义. 地理学报, 2003, 58(4): 598-605.

[21] 袁素芬, 唐海萍, 张宏锋. 短命植物层群落年内变化与水热条件的关系. 干旱区研究, 2015, 32(5): 941-946.

[22] 钱亦兵, 吴兆宁, 张立运, 赵锐锋, 王小燕, 李有民. 古尔班通古特沙漠短命植物的空间分布特征. 科学通报, 2007, 52(19): 2299-2306.

[23] 钟德才. 中国沙海动态演化. 兰州: 甘肃文化出版社, 1998.

[24] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. 生态学报, 2002, 22(11): 1923-1932.

[25] 季方, 叶玮, 魏文寿. 古尔班通古特沙漠固定与半固定沙丘成因初探. 干旱区地理, 2000, 23(1): 32-36.

[26] 刘彤, 崔运河, 翟伟, 贾亚敏, 张元杭, 谢江波. 莫索湾南缘沙漠植物群落多样性抽样方法的研究. 干旱区地理, 2006, 29(3): 367-374.

[27] 袁素芬, 唐海萍. 新疆准噶尔荒漠短命植物群落特征及其水热适应性. 生物多样性, 2010, 18(4): 346-354.

[28] 孙羽, 张涛, 田长彦, 李晓林, 冯固. 增加降水对荒漠短命植物当年牧草生长及群落结构的影响. 生态学报, 2009, 29(4): 1859-1868.

[29] 张海波, 刘彭, 刘立鸿, 兰海燕, 张富春. 新疆短命植物小拟南芥(*Arabidopsis pumila*)种子萌发特性及其生态适应性. 生态学报, 2007, 27(10): 4310-4316.

[30] Li B F, Chen Y N, Chen Z S, Xiong H G, Lian L S. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010?. Atmospheric Research, 2016, 167: 275-284.